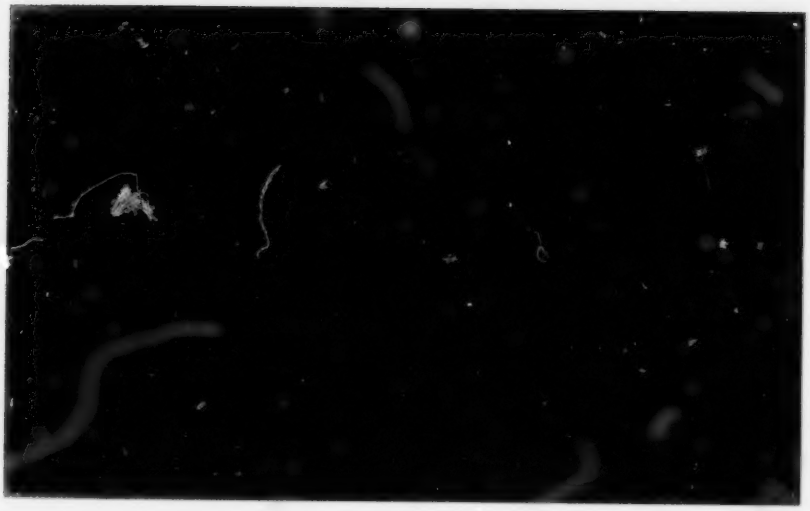
CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS
(C.R.T.)
CENTRE FOR RESEARCH ON TRANSPORTATION

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE DES HAUTES ÉTUDES COMMERCIALES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE



CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS
UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
C.P. 6128, SUCCURSALE A,
MONTRÉAL
CANADA H3C 3J7

TÉLÉPHONE: (514) 343-7575
TÉLEX: (21) 05-561325
EMAIL: crt@crt.umontreal.ca
TÉLÉCOPIEUR (FAX): (514) 343-7121

91-04082/

CRT-767

Le transport terrestre multimodal des conteneurs maritimes: une démarche de planification

par

Teodor Gabriel Crainic[1,2]
Pierre Dejax[3]
Michel Gendreau[1]

[1] Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, C.P. 6128, succursale A, Montréal, Canada H3C 3J7.
[2] Département des Sciences administratives, Université du Québec à Montréal, C.P. 6192, succursale A, Montréal, Canada H3C 4R2.
[3] Laboratoire Economique, Industriel et Social, Ecole Centrale Paris, 92295 Chatenay-Malabry Cedex, France.

Centre de recherche sur les transports — Publication #767
Cahiers d'études et de recherches, LEIS, Ecole Centrale Paris — 91 – 06

Avril 1991

Dépôt légal – 2ème trimestre 1991

RESUME

Nous décrivons la problématique générale et les enjeux de la planification de la distribution et du transport terrestre de conteneurs. Nous présentons ensuite notre démarche méthodologique pour la modélisation et la résolution intégrées du problème global et de ses composantes majeures: localisation des dépôts, prévision des flux de conteneurs vides requis pour rééquilibrer le réseau, détermination des itinéraires et modes de transport des conteneurs vides et pleins, gestion de la flotte et répartition, établissement des routes des véhicules qui assurent le transport. Nous passons ensuite brièvement en revue les données nécessaires au fonctionnement d'un système d'aide à la planification basé sur cette méthodologie et mentionnons quelques résultats concernant l'estimation des coûts et des demandes.

MOTS CLES: Gestion de flotte,
Transport terrestre multimodal de conteneurs,
Localisation de terminaux,
Allocation dynamique et stochastique des véhicules,
Estimation des coûts et de la demande.

ABSTRACT

We examine and discuss the main issues related to the management and planning of the land transportation of maritime containers. We then present our methodological framework for an integrated modeling and solution of both the general problem and its main components: location of inland terminals, planning of empty container flows to balance the network, construction of routes and choice of transportation modes for loaded and empty movements, fleet management, routing and allocation of vehicles required for transportation. We briefly review the data requirements of a decision support system based on this methodology, and mention results concerning the estimation of costs and demands.

KEY WORDS: Fleet Management,
Land Transportation of Maritime Containers,
Location of Terminals,
Dynamic, Stochastic Vehicle Allocation,
Cost and Demand Estimation.

Introduction

La planification du transport terrestre des conteneurs pour le commerce maritime international est devenue depuis quelques années une activité extrêmement complexe. Ceci s'explique par un contexte de compétitivité accrue qui force les entreprises à rechercher tant l'efficacité économique des opérations qu'une meilleure performance en termes de la qualité du service rendu à la clientèle. Qui plus est, considérant le caractère essentiellement multimodal des moyens de transport mis en oeuvre et la diversité des produits (types de conteneurs) à transporter, la situation actuelle d'évolution rapide de l'environnement économique et réglementaire, liée à l'ouverture imminente des frontières et à l'harmonisation correspondante du transport multimode, tant en Europe qu'en Amérique du Nord, accroît encore d'autant la complexité du processus de planification.

Dans ce contexte, les modèles et méthodes de recherche opérationnelle peuvent fournir une aide précieuse, et parfois déterminante, dans cette recherche d'efficacité et de satisfaction des besoins et attentes de la clientèle en permettant de rendre plus efficaces les moyens et méthodes d'évaluation, d'analyse et de planification des opérations et de l'évolution de la compagnie. Ces modèles et méthodes sont d'autant plus efficaces qu'ils se présentent sous la forme de logiciels d'aide à la prise de décision et à la planification conviviaux, offrant des interfaces interactives-graphiques, et qu'ils s'appuient sur un système d'information reliant toutes les instances décisionnelles et opératives du système: planification centrale, services commerciaux, planification des transports maritimes et gestion et opération de la flotte marchande, gestion de la flotte de conteneurs, opération des dépôts, etc. (Crainic et Dejax, 1989).

Il est surprenant toutefois de s'apercevoir, lors, par exemple, d'une étude de la littérature spécialisée (voir, par exemple, Dejax et Crainic, 1987), combien peu nombreux sont les modèles développés spécialement pour le transport des conteneurs, qui, par ailleurs, s'adressent presque exclusivement aux problèmes reliés à la partie maritime du voyage. Cet état de fait peut s'expliquer, au moins partiellement, par l'effet combiné de la complexité des problèmes associés à l'analyse et à la planification du transport terrestre de conteneurs et de l'opinion, prévalant jusqu'à tout récemment dans la profession du transport maritime, que cet aspect des opérations de la compagnie n'a qu'un impact somme toute assez négligeable sur les performances globales de l'entreprise. C'est surtout cette dernière perception qui,

graduellement, évolue actuellement vers la reconnaissance de l'importance de la partie terrestre des opérations sur les performances économiques et de service à la clientèle du système de transport de conteneurs dans un univers de plus en plus concurrentiel.

Nous avons entrepris notre programme de recherche dans ce domaine dans le but de répondre à ces besoins, en mettant au point un ensemble de modèles, algorithmes et outils qui assistent et améliorent l'évaluation, l'analyse et la planification du transport multimodal terrestre de conteneurs. Le but de cet article est de présenter une démarche méthodologique intégrée pour structurer le traitement du problème et pour aider la résolution de chacune de ses composantes, dans une approche globale de planification. Ce travail est basé en partie sur une étude du système logistique de transport terrestre des conteneurs effectuée pour une compagnie de transport maritime européenne (Dejax, Crainic et Delorme, 1991).

L'article suit le plan ci-après. Nous débutons par une description de la problématique générale et des enjeux de la planification de la distribution et du transport terrestre de conteneurs. Nous poursuivons par la présentation de notre approche de modélisation et de résolution pour le problème global et pour ses composantes majeures. Nous passons ensuite brièvement en revue les données nécessaires au bon fonctionnement d'un tel système d'aide à la planification et, afin de faire ressortir les difficultés d'acquisition et entretien de telles informations, nous mentionnons rapidement quelques résultats de nos recherches concernant deux aspects du problème qui, quoique ne présentant pas le panache et l'intérêt de, par exemple, la mise au point d'un nouvel algorithme de programmation mathématique, n'en ont pas moins une importance primordiale pour la bonne marche du système: l'évaluation des coûts et l'analyse de la demande. Nous concluons en proposant certaines avenues de recherche qui, à notre avis, présentent un intérêt pour le domaine du transport terrestre de conteneurs.

I. Problématique

Le type de compagnie de transport par conteneurs auquel nous nous intéressons gère un réseau maritime international et assure le transport terrestre des conteneurs entre les ports et un ensemble de clients industriels dispersés sur un territoire géographiquement de grande taille, voire continentale. A titre illustratif, une compagnie de transport maritime européenne effectue annuellement plusieurs centaines de milliers de mouvements de transport terrestre de conteneurs, et ce pour un coût de 1000 à 1500 FF par mouvement.

Les mouvements de conteneurs sont de deux types: ceux des conteneurs chargés, directement générateurs de profits, ou vides qui correspondent aux opérations commerciales (à l'importation ou à l'exportation) de l'entreprise, et les mouvements techniques (rééquilibrage de vides entre dépôts, mouvements de conteneurs loués ou avariés, etc.). Une séquence type de mouvements à l'importation est la suivante: les conteneurs arrivent chargés au port d'où ils sont transportés par voie terrestre jusqu'au client; après avoir été déchargés, les conteneurs vides sont alors renvoyés vers le port d'origine ou vers un autre des dépôts utilisés par la compagnie. La séquence "symétrique" à l'exportation débute avec une commande de conteneurs vides d'un client à la compagnie. Les conteneurs vides sont acheminés à partir du port d'exportation ou à partir d'un autre des dépôts utilisés par l'entreprise et, une fois chargés, ils sont transportés par voie terrestre jusqu'au port où ils sont embarqués sur le navire en partance vers leur destination finale.

En sus du transport des conteneurs, la compagnie doit également maîtriser la gestion des mouvements des véhicules porteurs, en particulier dans le cas du transport par route. De plus, elle doit assurer les acheminements nécessaires à la prise en compte des importations et exportations de conteneurs vides (typiquement, plusieurs milliers de mouvements par an), dûs au déséquilibre qui existe sur les lignes maritimes internationales.

Nous remarquons l'importance des mouvements de conteneurs vides. Premièrement, tout mouvement commercial de conteneur chargé génère presque automatiquement un mouvement à vide. En effet, à l'importation, un conteneur plein livré à un client est, une fois déchargé, normalement transporté à vide jusqu'au dépôt désigné. Similairement, à l'exportation, un conteneur vide doit d'abord être livré au client demandeur avant que le mouvement chargé puisse être effectué (et facturé).

Une deuxième source importante de mouvements à vide est constituée par les différences que l'on peut observer à l'intérieur d'une zone donnée entre les demandes pour des conteneurs vides d'un type donné et le nombre de conteneurs de même type reçu dans la région et qui, une fois déchargés, pourront satisfaire cette demande. L'intensité de ce déséquilibre entre l'offre et la demande de conteneurs vides varie selon la zone et le type de conteneurs et nécessite des mouvements entre les zones (ainsi qu'éventuellement des mouvements maritimes) afin de rééquilibrer le réseau.

Les mouvements à vide occupent ainsi une place déterminante dans les opérations de transport terrestre de conteneurs, tant par l'impact considérable qu'il peuvent avoir sur la qualité de service, que par les ressources qu'ils mobilisent. A cet égard, il peut être utile de rappeler que, dans la pratique courante, ce type de mouvements représente jusqu'à 40% des coûts d'opération (Dejax, Crainic et Delorme, 1991). Or, si les mouvements à vide sont largement inévitables, il est possible d'en contrôler l'intensité par une planification logistique judicieuse et intégrée des opérations, au niveau de tout le réseau, tant à court qu'à moyen et long termes. C'est un des buts principaux des modèles et outils d'aide à la décision que nous proposons.

Mentionnons quelques autres caractéristiques d'un système de transport terrestre de conteneurs, géré par une compagnie de transport maritime, qui ont une influence majeure sur sa planification et, donc, sur sa modélisation:

- Il y a un nombre important de types différents de conteneurs; on doit en considérer environ une vingtaine pour s'assurer d'une analyse réaliste, se distinguant par la taille (p.e. 20 pieds, 40 pieds, ...), la fonctionnalité (usage général, isotherme, frigorifique, etc. ...), l'affectation à des lignes particulières (p.e. les Antilles Françaises), etc.

- La compagnie fait régulièrement appel à plusieurs modes de transport terrestre. Ces modes se distinguent par le type d'infrastructure utilisée (rail, route, canaux/rivières, etc.), le caractère uni ou multimodal du transport (déterminé, dans le cas du rail, par exemple, selon que le client possède un embranchement ferroviaire qui lui est propre ou qu'il faut utiliser une combinaison rail-route), le caractère national ou international du voyage, le régime de transport indiquant à qui incombe la responsabilité du transport terrestre. Les principales règles régissant ce dernier point sont: 1) la compagnie est responsable de la totalité du transport ("carrier haulage" – environ 70% des

mouvements pour notre application – Dejax, Crainic and Delorme, 1991); 2) le client organise le transport en tout ou en partie à ses frais (''merchant haulage'' ou ''formule mixte'' – 20% des mouvements). Il faut noter que, pour le problème décrit dans cet article, transport ''terrestre'' doit être pris dans un sens très large, signifiant en fait tout transport non maritime de long cours.

- Dans le cas du camionnage, le mode est aussi déterminé par le type de contrat liant la compagnie et le camionneur (souvant, ce type de compagnie ne possède en propre qu'une flotte très réduite de camions): aller seulement, aller et retour entre client et dépôt, parcours ''triangulaire'' de client à client, etc.

- Traditionnellement, les ports servent aussi de dépôts. Ils sont, en fait, l'endroit de prédilection pour le stockage des conteneurs et la principale source pour la fourniture de conteneurs vides au clients. Bien que les compagnies de transport maritime aient accès à de nombreux dépôts situés à l'intérieur des terres (en particulier, les gares ferroviaires équipées d'installations porte-conteneurs utilisées pour effectuer les transbordements dans le cas du transport multimodal rail–route), ceux-ci sont en pratique peu utilisés pour le stockage et la fourniture de conteneurs vides. Ceci occasionne donc un mouvement important, en termes de conteneurs-km de conteneurs vides, qu'il est possible de diminuer en faisant davantage appel aux dépôts intérieurs.

- Il est possible d'utiliser de tels dépôts tout en encourant des coûts de localisation et d'opération minimes, en se basant sur des installations déjà existantes, par exemple, les gares de triage des compagnies de chemin de fer. Les coûts fixes relativement bas des dépôts inhérents à ce système rendent possible une réévaluation périodique du nombre et du choix spécifique des dépôts à utiliser, ce qui permet d'ajuster plus finement le comportement du système à l'évolution des marchés ou de l'environnement économique, concurrentiel ou réglementaire.

- Comme évoqué plus haut, des transferts de conteneurs sont effectués régulièrement entre les dépôts, portuaires ou intérieurs. Alors, dans le cas de l'expédition groupée d'un nombre important de conteneurs (un ou plusieurs trains complets, par exemple), des tarifs spéciaux, plus bas que ceux du transport unitaire, peuvent être obtenus (auprès des compagnies de chemin de fer, par exemple).

Parmi les problèmes de planification les plus importants qu'on se doit d'analyser et de résoudre dans un tel contexte, mentionnons:

- La localisation des dépôts, portuaires ou intérieurs, sur lesquels concentrer les flux lors de la prochaine période de planification.
- Pour chaque client et pour chaque type de conteneurs, décider les dépôts avec lesquels le client doit faire affaire lorsqu'il demande des conteneurs vides pour l'exportation ou lorsqu'il doit y expédier les conteneurs déchargés, après une importation.
- Prévoir et optimiser les flux inter-régionaux de conteneurs vides afin de compenser les différences entre l'offre et la demande de conteneurs et ainsi rééquilibrer le réseau.
- Assurer la gestion et la répartition de la flotte de conteneurs, vides et pleins, afin de satisfaire la demande connue et prévue et de réaliser les mouvements inter-dépôts de conteneurs vides requis.
- Déterminer l'acheminement (trajets éventuellement multimodaux) des conteneurs pleins et vides afin de satisfaire la demande, respecter les échéances et minimiser les coûts.
- Construire, lorsqu'approprié, des itinéraires de véhicules (surtout de camions), et choisir la tarification et le type de contrat correspondant, afin de les proposer aux transporteurs dans le but de diminuer les coûts de transport du système.

Nous présentons dans la prochaine section l'approche de modélisation et de résolution que nous proposons pour répondre à ces questions.

II. Approche de modélisation

Lorsque nous avons débuté l'analyse des problèmes reliés à la planification et à la gestion du transport terrestre de conteneurs, nous avons d'abord reconnu (i) que tous les problèmes ne se situent pas au même niveau dans le processus de planification et de gestion des opérations de la compagnie, qu'ils n'impliquent pas le même personnel, et qu'ils ne requièrent pas les mêmes ressources pour leur planification ou pour leur exécution; (ii) que tous les problèmes ne font pas appel aux mêmes données; (iii) qu'il y a une hiérarchie dans la séquence de décisions et, donc, dans le flux d'informations correspondant; (iv) qu'il n'est donc pas souhaitable de construire un seul modèle qui tente de résoudre tous les problèmes en même temps.

Nous avons en fait retrouvé dans le contexte du transport terrestre de conteneurs la même hiérarchie, et le même type de définition, des niveaux de planification normalement rencontrée dans la gestion des entreprises de transport, en particulier, et industrielles, en général (voir, par exemple, Assad, 1980; Crainic et Roy, 1988; Dejax et Crainic, 1987):

- *stratégique*, sélection des dépôts, intérieurs ou portuaires, sur lesquels concentrer les flux lors de la prochaine période;
- *tactique*, détermination des zones logistiques de clientèle à associer à chaque dépôt (indiquant le dépôt avec lequel chaque client devra traiter pour chaque type de conteneur et pour chaque type de transaction – demande ou retour de conteneur vide), ainsi que les flux inter-dépôts de conteneurs vides de chaque type, requis pour équilibrer l'offre et la demande de conteneurs pour la durée de la période de planification;
- *opérationnel*, détermination des transports de conteneurs chargés et vides à effectuer, choix des trajets et des modes de transport, ainsi que sélection des routes des véhicules.

Il est important de noter toutefois que, dans le cas des systèmes de distribution et de transport terrestre de conteneurs, le choix des dépôts de concentration des flux est une décision *temporaire* à réévaluer périodiquement. Cette caractéristique permet de fusionner les formulations stratégiques et tactiques et, de traiter ainsi en une seule étape des problèmes de planification stratégique et tactique qui sont, en général, distincts.

Nous proposons donc une approche de résolution à deux niveaux, qui reflète la structure hiérarchique des décisions et des échanges d'informations des systèmes de distribution et de transport terrestre des conteneurs. La figure 1 illustre cette approche.

Le premier niveau concerne la planification **stratégique/tactique** des opérations de la compagnie, et est axé vers le choix des dépôts, la spécification des zones logistiques de clientèle des dépôts et la détermination des flux inter-dépôts de conteneurs vides, sur un horizon de planification moyen (six mois ou une année), à partir de prévisions globales et de données agrégées.

Le modèle stratégique/tactique se formule comme un problème de *localisation/distribution multimode multiproduit avec des échanges entre les dépôts* (Crainic, Dejax et Delorme, 1989). Nous avons étudié diverses variantes (correspondant à diverses politiques de rattachement des clients aux dépôts) de cette formulation qui, tout en présentant certaines similitudes avec les problèmes classiques de localisation, possède des caractéristiques particulières. La plus intéressante parmi celles-ci est une structure sous-jacente de réseau qui favorise le développement d'algorithmes spécifiques, plutôt que le recours à des méthodes générales de résolution pour des problèmes de localisation avec contraintes additionnelles.

Parmi les algorithmes développés spécialement pour cette formulation, mentionnons une méthode d'énumération et de séparation progressive (''branch-and-bound'' – Crainic, Delorme et Dejax, 1991; Hodgson, 1989) dont l'expérimentation a démontré, entre autres, que les règles de branchement utilisées pour résoudre des problèmes de localisation classiques ne sont pas efficaces dans le cas présent. Nous avons également mis au point, outre les diverses heuristiques glouton et d'échanges (Guo, 1990) de rigueur, des procédures basées sur une approche duale ascendante (Crainic et Delorme, 1991) et sur la relaxation Lagrangienne (Guo, 1990; Guo et col., 1989). Ces procédures nous permettent soit d'obtenir efficacement des solutions approchées de très grande qualité, soit de calculer des bornes ''serrées'' pour les algorithmes d'énumération et de séparation progressive lorsque la solution optimale est désirée. Dernièrement, nous avons entrepris l'étude du comportement et des performances des méthodes de recherche avec tabous (''tabu search'' – Glover, 1989, 1990) pour ce problème, tandis que nous poursuivons la mise au point d'algorithmes qui combinent des méthodes de restriction avec une approche primale/duale (Tétreault 1989; Tétreault, Delorme et Crainic,

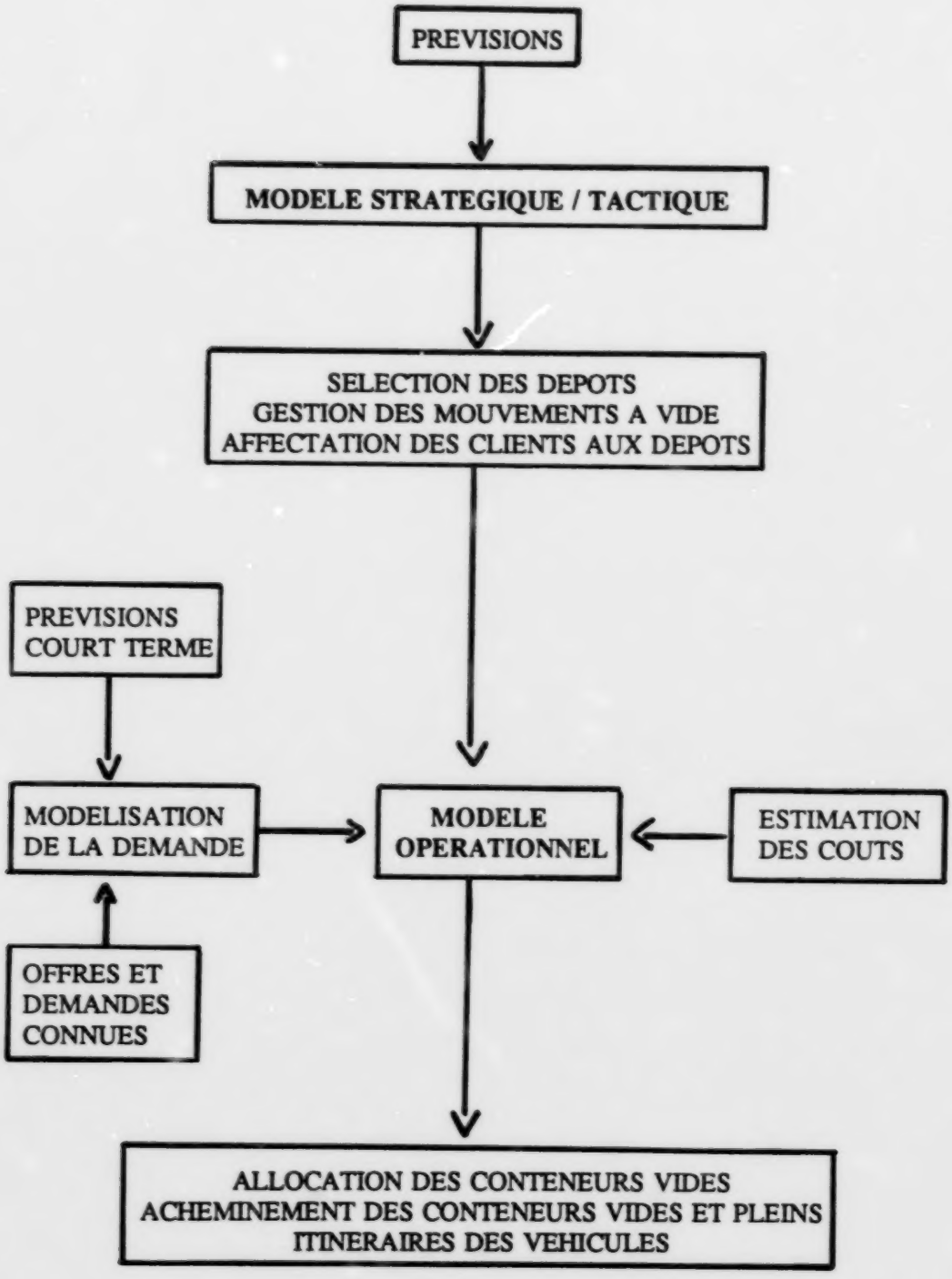


Figure 1 Structure de l'approche générale de résolution

1989) permettant de tirer pleinement parti de la structure de réseau de la formulation.

L'efficacité des méthodes de résolution nous assure que le problème stratégique/tactique pourra être résolu aussi souvent que les variations de la demande ou du contexte économique ou réglementaire le demandera. De plus, le *plan stratégique/tactique* des opérations résultant de cette étape constitue un moyen privilégié d'évaluation, en termes de performances du système et d'utilisation du réseau, des scénarios stratégiques concernant l'évolution logistique de la compagnie, et fournit le cadre à l'intérieur duquel les activités du prochain niveau de planification doivent évoluer.

Le second niveau correspond au niveau de la planification **opérationnelle** des activités, où, dans un environnement dynamique, il s'agit de répondre à la demande tout en gérant le système afin de minimiser les coûts reliés à l'allocation et au transport des conteneurs vides et pleins, et de satisfaire les objectifs de qualité de service. Le but recherché est d'offrir un outil d'aide à la décision qui permettra de répondre à des questions telles que: Comment satisfaire les demandes des clients, à partir de quels dépôts, et doit-on faire appel à des substitutions? Quel niveau d'inventaire garder dans chaque dépôt pour chaque type de conteneur afin de faire face aux demandes imprévues? Quand déclencher les mouvements massifs inter-dépôts de conteneurs vides spécifiés par le plan de transport afin de reéquilibrer le système? Quand acheter de nouveaux conteneurs et quand faire appel aux compagnies partenaires? Comment acheminer les conteneurs vides et pleins?

Idéalement, une unique formulation mathématique serait utilisée pour optimiser l'ensemble des décisions court-terme, afin de tenir compte le plus fidèlement possible de toutes les interactions entre les divers éléments du système. Cependant, étant donné la complexité du problème, ainsi que l'état de l'art des méthodes de résolution actuelles, une telle solution n'est pas envisageable, du moins pas si l'on désire que le système d'aide à la planification soit utile en milieu industriel.

Nous proposons donc de séparer les deux composantes principales du problème, et de résoudre deux problèmes "plus simples": un problème *d'allocation des conteneurs vides* permettant la détermination des origines et destinations des transports à vide à effectuer entre ports, dépôts et clients, et un problème *d'acheminement des conteneurs pleins et vides* prenant en compte les transports chargés à mettre en oeuvre, ainsi que les transports de conteneurs

vides à effectuer tels que déterminés ci-dessus, afin de déterminer les itinéraires, possiblement multimodaux, des mouvements de conteneurs, ainsi que les routes des véhicules devant assurer ces transports. La figure 2 illustre cette approche.

L'approche que nous proposons pour le modèle d'allocation des conteneurs vides consiste en un modèle d'optimisation de réseau généralisé multiproduit stochastique et dynamique (Crainic, Gendreau et Dejax, 1990).

La partie dynamique de la formulation reflète les effets des décisions courantes sur les mouvements des conteneurs à la fois dans la période actuelle et dans les périodes subséquentes. Ces effets sont représentés par l'intermédiaire d'un réseau espace/temps, dont les noeuds représentent les localisations des dépôts et des clients à chacune des périodes considérées, tandis que les liens modèlisent les mouvements possibles de conteneurs à la fois dans l'espace et dans le temps. Le réseau est défini sur un horizon fuyant, dont la durée dépend de la durée maximale d'un déplacement et de celle de l'horizon de planification opérationnelle, normalement d'une à deux semaines.

Les élements stochastiques du modèle modélisent les incertitudes inhérentes à l'opération en temps réel d'un système de transport. Les principales sources de stochasticité que nous représentons sont la partie incertaine de la demande des clients connus (l'incertitude peut s'accroître avec l'éloignement dans le temps par rapport à la période courante), celle potentielle à l'intérieur de chaque zone, ainsi que celle des autres parties, extérieures au système étudié, du réseau international de transport et de distribution des conteneurs, et les variations des durées passées par les conteneurs chez les clients pour être chargés ou déchargés.

Le but du modèle d'acheminement est de minimiser le coût total de transport des conteneurs pleins et vides, tout en tenant compte des délais et des objectifs de service à respecter. Les données de ce modèle sont la liste de requêtes de mouvements de conteneurs vides produite pour la première période de l'horizon de planification par le modèle d'allocation, ainsi que la liste de requêtes de mouvements de conteneurs pleins fournie par le système d'information (M.I.S.) de l'entreprise. D'autres données importantes, disponibles également à partir du M.I.S., décrivent l'environnement dans lequel les décisions de transport doivent être prises: les caractéristiques de coût, distance et durée des divers modes de transport disponibles (ferroviaire, camionnage, fluvial, mixte, etc.), les options possibles de contrat avec les trans-

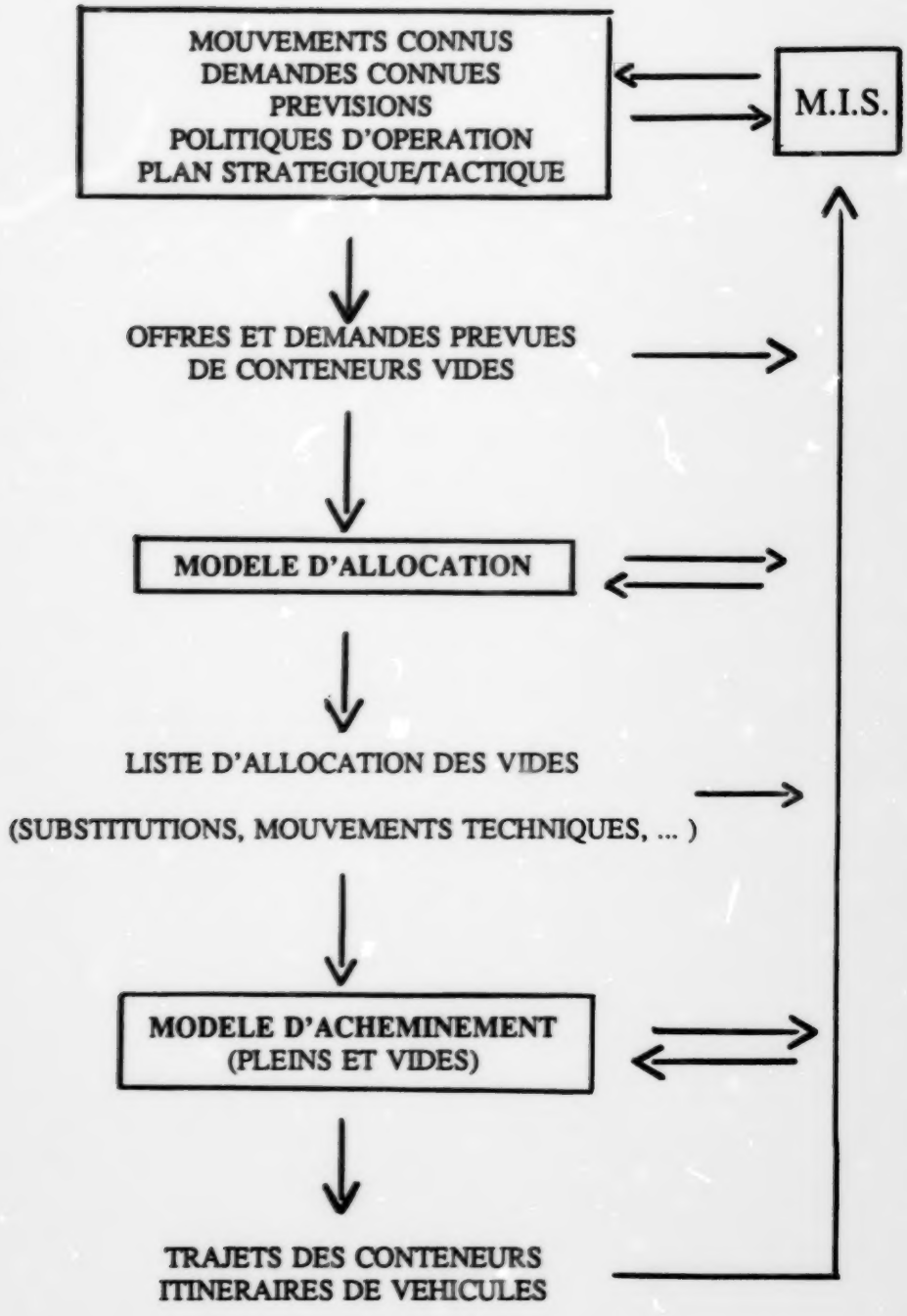


Figure 2 Schéma du système d'aide à la planification opérationnelle

porteurs (aller simple, aller et retour, circuit, etc.), le régime de transport pour chaque chargement indiquant qui du client ou de la compagnie est responsable du transport, les arrangements particuliers de chaque client concernant ses horaires et délais de livraison, les contraintes spécifiques concernant le chargement de chaque type de conteneur sur chaque type de véhicule, etc.

La formulation de programmation mixte s'apparente à la classe des problèmes de recouvrement d'ensembles généralisé, et détermine simultanément les trajets, éventuellement multimodaux, des conteneurs et les itinéraires des véhicules pour des modes spécifiés. Ces résultats, une fois validés et approuvés pour exécution, sont transmis au M.I.S. pour permettre la mise-à-jour des estimations de coûts, ainsi que de la liste des mouvements connus et prévus.

Il est important de noter que de substantielles économies peuvent être réalisées par l'utilisation d'un tel modèle d'acheminement, surtout dans le cas du transport par camion. Dans ce cas, la plupart des économies sont obtenues en engendrant des itinéraires de véhicules en "circuit", comportant plusieurs arrêts, qui desservent ainsi plusieurs requêtes de mouvement de conteneurs.

Mentionnons également que ces modèles opérationnels doivent, afin de pouvoir jouer pleinement leur rôle, être intégrés dans un système interactif-graphique d'aide à la prise de décision, fonctionnant en temps réel (ou pseudo-réel) et qui est branché sur le système d'information de l'entreprise (Crainic et Dejax, 1989).

III. Détermination de la structure du réseaux et des informations pertinentes

La mise au point, l'expérimentation et la validation des modèles et algorithmes que nous proposons requièrent la connaissance de multiples informations concernant le système étudié sur une courte période. Ces besoins ne sont cependant que le pâle reflet de l'apport continu de ces mêmes éléments d'information qui est requis pour assurer une implantation adéquate et l'utilisation continue d'un système d'aide à la planification et à la gestion tel que décrit précédement.

Ainsi donc, outre les données d'ordre technique (telles, par exemple, les caractéristiques des divers types de conteneurs, les régles déterminant quels types de conteneurs peuvent être transportés par quels types de véhicules, les substitutions permises entre les divers types de conteneurs, etc.) et le nécessaire flux d'informations assurant la transmission des décisions entre les divers niveaux de planification et de gestion, le système d'information doit assurer l'accès aux données permettant la définition et la mise-à-jour de la représentation du réseau physique de distribution et de transport, ainsi que l'estimation des coûts et la prévision des offres et des demandes.

Le degré de détail de la représentation du réseau ou le raffinement de la précision des estimations des coûts ou des demandes peuvent varier avec le problème étudié et le niveau de planification correspondant. Tous les modèles mentionnés dans la section précédente font cependant appel à ces mêmes éléments d'information. Nous examinons brièvement dans cette section quelques aspects importants reliés à leur modélisation et estimation, tels qu'ils ressortent d'une étude effectuée pour une compagnie maritime européenne.

Les réseaux

Le réseau de base pour l'ensemble de nos recherches représente le réseau des opérations terrestres de l'entreprise: les dépôts, les clients et les liens entre ces localisations. La représentation de ce réseau sera plus ou moins fine selon le niveau de planification envisagé.

Une représentation plutôt agrégée est ainsi requise pour le problème stratégique/tactique qui détermine les dépôts à utiliser, l'affectation des clients aux dépôts, ainsi que les flux majeurs de conteneurs vides nécessaires afin de rééquilibrer le réseau. Dans notre application, nous avons identifié ce réseau à partir de l'ensemble des mouvements effectués par

l'entreprise pendant toute une année. La zone géographique de l'étude stratégique/tactique a été subdivisée de manière à obtenir des zones les plus cohérentes possibles, tant sur le plan du trafic de conteneurs que sur celui de la taille géographique. Nous avons ainsi obtenu 288 zones-clients. Quant aux dépôts, nous avons retenu tous les ports et tous les dépôts identifiés par la compagnie (même ceux qu'elle n'utilisait pas dans l'année étudiée); cela fit 129 dépôts.

Toutes les liaisons effectuées par l'entreprise dans l'année de base ont été retenues. Il faut remarquer que, même après avoir ajusté ce réseau afin de donner plus de latitude aux modèles d'optimisation, le nombre de liens n'est que d'environ 10 000, ce qui est très loin du 3 469 440 arcs d'un graphe complet (pour 20 types de conteneurs, que nous agrégeâmes en 12, mais un seul mode de transport) correspondant à ce problème. Il est évident devant cette taille potentielle de réseau que, même si plus de liaisons que celles effectivement effectuées à une année donnée doivent être incluses dans la représentation du réseau afin de profiter pleinement de la puissance des méthodes d'optimisation (surtout dans une phase d'exploration de scénarios), des décisions "logistiques" doivent être prises a priori afin d'éviter l'inclusion d'un grand nombre de liens inutiles.

Une représentation beaucoup plus fine est cependant requise pour le diagramme espace-temps utilisé par le modèle opérationnel d'allocation de conteneurs vides. Ainsi, uniquement les dépôts utilisés pendant une période donnée feront partie de ce réseau. De plus, pour chaque strate du réseau, correspondant à un type de conteneur, et pour chaque période de l'horizon de planification considéré, le réseau doit inclure les clients "actifs", ainsi que tous les arcs nécessaires pour representer les diverses décisions possibles: transport, distribution, stockage, substitution, etc.

Notons toutefois que, même dans ce contexte, une représentation exacte du réseau de transport terrestre multimodal n'est pas nécessaire. Cela le devient, cependant, lors de la construction du diagramme espace-temps utilisé par le modèle d'acheminement des conteneurs pleins et vides et d'établissement d'itinéraires de véhicules.

Les coûts

Dès le début de l'étude, nous disposions des coûts effectivement observés sur les liaisons effectuées dans l'année de base. Ces informations nous ont été fort précieuses, nous

permettant de valider le modèle stratégique/tactique et de démontrer l'intérêt de la méthode et les améliorations qu'on peut atteindre en l'utilisant.

Ces informations ne sont toutefois plus suffisantes dès qu'on envisage d'utiliser l'approche que nous proposons pour prévoir et planifier. En effet, il faut alors connaître les coûts pour tous les modes de transport à notre disposition, sur toutes les liaisons possibles.

Nous avons donc entrepris (Vasseur, 1988) une étude préliminaire visant à déterminer si, à partir des informations concernant les coûts sur les arcs connus, nous pouvons déduire, à l'aide de logiciels de régression statistique, une (ou des) formule(s) générale(s) pour les coûts. L'étude est préliminaire, car son objet a été limité aux liens de chemin de fer pour lequel nous avons pu bénéficier d'un distancier fer de la SNCF couvrant le territoire français. Par ailleurs, nous avons entrepris la généralisation de cette méthodologie aux autres modes de transport (Vasseur et col., 1991).

Il est aussi important de préciser que nous ne cherchons pas des formules de coût "exactes", à utiliser dans un environnement comptable ou de facturation, mais bien une façon systématique d'attribuer des valeurs aux liens qui reflètent aussi fidèlement que possible ces coûts dans un objectif de planification. Une brève présentation de l'étude de l'estimation des coûts de transport par mode ferroviaire illustrera la démarche.

A partir de l'observation des données de la compagnie, nous avons choisi comme variables explicatives possibles le *poids* des conteneurs transportés, leur *nombre*, le *nombre de clients desservis* et la *distance*. Les facteurs qui déterminent la population pour laquelle une fonction est cherchée sont: la *taille et type de conteneur*, la *région d'arrivée* et la *région de départ*, le *mode* (rail ou combinaison rail-route) et la *responsabilité* du transport et, enfin, le *degré de chargement* (plein, vide) du conteneur. Suite à l'expérimentation, nous avons remarqué que la spécification des zones d'arrivée et de départ n'est pas nécessaire pour définir les fonctions. Cela est dû à l'homogénéité implicite des tarifs de la SNCF sur le territoire. Nous cherchons présentement à voir si nous obtenons le même résultat pour le camionnage. Le logiciel **BMDP** (Dixon, 1983) a été utilisé pour effectuer les analyses de régression statistique.

Plusieurs formes linéaires ont dû être écartées, soit à cause d'un trop faible coefficient d'ajustement, soit à cause du caractère non aléatoire des résidus obtenus.

Finalement, la forme fonctionnelle qui donne les meilleurs résultats (en termes de précision et d'ajustement) pour les types de transport ferroviaire étudiés est:

$$coût = a\ (poids/nombre)^b + (nombre)^c + (distance)^d$$

où les paramètres a, b, c et d dépendent du type de conteneur et du type ou régime de transport, ce qui est également "intuitivement" satisfaisant, puisqu'on s'attend à ce que les effets des variables explicatives se combinent plutôt que de se juxtaposer tout simplement. Nous poursuivons actuellement cette étude pour les autres types de transport ferroviaire et pour les autres modes de transport, surtout les divers types de camionnage.

Les offres et demandes

L'estimation des offres et demandes de conteneurs constitue un des aspects déterminants du processus de planification. Ainsi, il est évident que les modèles et systèmes d'aide à la décision se baseront sur les prévisions, à court et moyen termes, établies par l'entreprise, que ce soit par les départements commerciaux (marketing, ventes, etc.) ou ailleurs. Dans le cas de nos travaux, ces informations n'étaient cependant pas disponibles. Nous avons donc dû les estimer, à partir des observations de l'année de base, en utilisant les mouvements de conteneurs pleins pour en déduire les disponibilités et demandes de conteneurs vides (Dejax et col., 1987).

Cependant, pour faciliter la mise au point des modèles, et des algorithmes correspondants, dynamiques et stochastiques pour la planification opérationnelle et les activités de répartition, nous avons dû entreprendre l'examen des variations de la demande à court terme, dans notre cas sur un horizon journalier. Le but de cette étude est de déterminer une (ou des) formule(s) pour la demande moyenne de conteneurs et la distribution qui régit les variations de cette demande.

Nous avons achevé (Steffan, 1989; Gendreau et coll. 1990) la première étape de cette étude, destinée surtout à préciser l'ensemble des outils statistiques requis et à obtenir un premier tableau, à raffiner au cours d'analyses ultérieures, des lois régissant la stochasticité de la demande. Remarquons aussi que les données dont nous disposions n'étaient malheureusement

pas bien adaptées à ce genre d'études: pas assez nombreuses lorsque divisées par zone/période/type de conteneur et pas assez fiables quant aux dates d'enregistrement.

Dans un premier temps, nous avons analysé l'influence des jours de la semaine sur la demande hebdomadaire pour chaque type de conteneur. Les résultats de plusieurs analyses de régression ont montré, toutefois, que les jours de la semaine ne sont pas statistiquement significatifs, sauf par rapport aux jours du week-end, bien entendu. Nous avons donc étudié d'abord la demande hebdomadaire par type de conteneur, et ensuite la demande par couple (produit, zone).

Les résultats obtenus sont encourageants, compte tenu de la qualité et du volume des données disponibles. Pour tous les cas où les demandes sont fortes (par exemple, au moins 300 conteneurs par produit-zone par année), nous avons réussi soit à identifier une distribution (*Normale* ou *Poisson*, selon le cas), soit à déterminer un modèle de demande basé sur une série chronologique (Box et Jenkins, 1976). Nous avons aussi observé que ces modèles sont différents entre eux, donc difficilement généralisables, et que, de plus, la plus grande partie de la demande totale est générée par des clients dont la demande ne dépasse pas 50 conteneurs par an.

Deux conclusions majeures se dégagent de cette étude. Premièrement, il est possible d'identifier des modèles statistiques de prévision de la demande, même s'il est probable qu'il soit nécessaire d'en estimer plusieurs, afin de représenter adéquatement des couples (produit, zone) importants. Deuxièmement, un modèle pour la demande des clients à faible volume et pour la demande "inattendue", non prévue, devra aussi être calibré et associé à tous les autres couples (produit, zone). Nous espérons continuer ces recherches, à l'aide de données plus nombreuses correspondant aux opérations sur plusieurs années, afin de pouvoir mieux valider ces hypothèses.

Conclusion

Avec l'accroissement des échanges internationaux dans un univers toujours plus concurrentiel et exigeant en termes de productivité, de fiabilité et de niveau de service à offrir à la clientèle, on assiste à un développement important du rôle du transport multimodal et conteneurisé. Ceci est particulièrement le cas à l'échelle de continents tels que l'Europe et l'Amérique du Nord, où ce phénomène est encouragé par les perspectives offertes par le libre-échange entre les Etats-Unis et le Canada (et, bientôt, le Mexique), d'une part, et le marché unique européen, d'autre part.

Après avoir évoqué la problématique du transport terrestre multimodal de conteneurs, telle qu'elle se pose pour les compagnies de transport maritime, nous avons décrit la démarche méthodologique que nous proposons pour ce problème: une approche hiérarchique combinant un modèle stratégique/tactique, qui détermine les dépôts à utiliser et les flux optimaux de conteneurs vides requis pour rééquilibrer le réseau sur une longue période, et un modèle opérationnel de répartition, d'acheminement et de construction de tournées et d'itinéraires, basé sur une formulation d'optimisation de réseau dynamique et stochastique. Nous avons aussi brièvement évoqué les problèmes inhérents à de telles méthodes, soit la construction du réseau, l'estimation des coûts et l'évaluation de la demande et de ses variations.

Tout n'est pas encore résolu et des problèmes de recherche intéressants restent à étudier (estimation de la demande, intégration des problèmes de choix de mode et route aux modèles de répartition, etc.), mais nos travaux prouvent à la fois l'intérêt du problème de la planification du transport terrestre de conteneurs pour la théorie et la pratique de la recherche opérationnelle appliquée aux transports, et l'impact significatif que l'utilisation de méthodes et outils de recherche opérationnelle peut avoir sur les performances d'un système de transport. Ceci est d'autant plus important qu'actuellement différents pays ainsi que la Communauté Européenne investissent des moyens de recherche importants pour l'amélioration et l'harmonisation des systèmes de transport de marchandises. C'est en particulier le cas des programmes français PREDITT et européen EURET. Dans ce contexte, nous espérons que les démarches de planification et de modélisation que nous proposons contribueront à ces efforts.

Remerciements

Ces travaux ont été rendus possibles grâce à une subvention du Fonds F.C.A.R. du Québec, à des subventions pour dépenses courantes du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, ainsi qu'à une subvention de projet conjoint Québec/France de la Commission permanente franco-québécoise.

Références

Assad A.A. (1980), *Models for rail transportation*, **Transportation Research A**, 14A, 205-220.

Box, G.E.P. et Jenkins, G.M. (1976), *Time Series Analysis, Forecasting and Control*, Holden-Day.

Crainic T.G. et Delorme L. (1991), *Dual-Ascent Procedures for Multicommodity Location/Allocation Problems with Balancing Requirements*, Publication #759, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, soumis à **Transportation Science**.

Crainic T.G., Gendreau M. et Dejax P.J. (1990), *A Dynamic Stochastic Model for the Allocation of Empty Containers*, Publication #713, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, soumis à **Operations Research**.

Crainic T.G., Dejax P.J. et Delorme L. (1989), *Models for Multimode Multicommodity Location Problems with Interdepot Balancing Requirements*, **Annals of Operations Research** 18, 279-302.

Crainic T.G., Delorme L. et Dejax P.J. (1991), *A Branch-and-Bound Method for Multicommodity Location with Balancing Requirements*, à paraître dans **European Journal of Operations Research**.

Crainic T.G. et Dejax P.J. (1989), *Freight Distribution and Transportation Systems Planning*, **International Journal of Physical Distribution & Materials Management** 19(1), 3-12.

Crainic T.G. et Roy J. (1988), *OR Tools for the Tactical Planning of Freight Transportation*, **European Journal of Operations Research** 33(3), 290-297.

Dejax P.J., Crainic T.G. et Delorme L. (1991), *The Strategic Planning of a Container Land Transportation System*, Cahiers d'études et de recherches #91-07, Laboratoire Economique, Industriel et Social, Ecole Centrale Paris, soumis à **European Journal of Operations Research**.

Dejax P.J. et Crainic T.G. (1987), *A Review of Empty Flows and Fleet Management Models in Freight Transportation*, **Transportation Science** 21(4), 227-247.

Dejax P., Crainic T.G., Delorme L., Bloise M., de Tocqueville E. et Hodgson J. (1987), *Planification tactique du transport terrestre des conteneurs vides - Rapport principal*, Rapport de recherche pour une compagnie de transport maritime de conteneurs.

Dixon, W.J. (1983), *BMDP Statistical Software Manual*, University of California Press; 1964, programme et manuel révisés en 1983.

Gendreau M., Crainic T.G., Dejax P.J. et Steffan H. (1990), *Forecasting Short-Term Demand for Empty Containers: A Case Study*, Publication #714, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, soumis à **Transportation Research Records**.

Glover, F. (1989), *Tabu Search–Part I*, **ORSA Journal on Computing** 1(3), 190-206.

Glover, F. (1990), *Tabu Search–Part II*, **ORSA Journal on Computing** 2(1), 4-32.

Guo, Z. (1990), *Résolution heuristique et optimale du problème de localisation de dépôts avec équilibrage*, Thèse de doctorat, Département de génie industriel, Ecole Centrale Paris.

Guo, Z., Dejax, P.J., Crainic, T.G. et Delorme, L. (1989), *Résolution heuristique du problème de localisation-distribution avec équilibrage*, Actes du Colloque **Logistique: Production, Distribution, Transport**, AFCET, Paris, 13-15 décembre.

Hodgson Jr., J. (1989), *Application d'une méthode de "branch-and-bound" au problème de localisation avec transferts entre les dépôts*, Mémoire M.Sc., Publication #622, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

Steffan, H. (1989), *Etude de la demande de conteneurs vides à court terme*, Rapport de stage fin d'études de l'Ecole Centrale Paris, Publication #651, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

Tétreault, Nicole (1989), *Une approche de restriction basée sur une méthode primale-duale pour résoudre le problème de localisation - distribution avec échanges interdépôts*, Mémoire M.Sc., Publication #681 Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

Tétreault N., Delorme L. et Crainic T.G. (1989), *Primal-Dual Methods for Location Problems with Balancing Requirements*, **CORS/TIMS/ORSA Joint National Meeting**, Vancouver, 8-10 mai.

Vasseur, C. (1988), *Les coûts du transport ferroviaire par conteneurs en France: étude de cas*, Rapport de stage fin d'études de l'Ecole Centrale Paris, Publication #650, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

Vasseur C., Dejax P.J., Crainic T.G. et Delorme L. (1990), *La modélisation du coût du transport ferroviaire par conteneur: une étude de cas en France*, **Actes du 3e Congrès International de Génie Industriel en France**, Groupement de génie industriel, 1176-1185.